



普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材

高等学校土木工程学科

专业指导委员会规划教材（按新专业规范编写）

流体力学

张维佳 主编

刘鹤年 主审

中国建筑工业出版社

普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材
高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材
(按新专业规范编写)

流 体 力 学

张维佳 主编

刘鹤年 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/张维佳主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 7

普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材. 高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材(按新专业规范编写)

ISBN 978-7-112-13201-0

I. ①流… II. ①张… III. ①流体力学-高等学校-教材 IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 085336 号

本书是普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材, 根据《土木工程指导性专业规范》(2010)由高等学校土木工程学科专业指导委员会规划编写。

全书共分 9 章, 主要内容有: 绪论, 流体静力学, 流体动力学基础, 流动阻力, 有压流动, 明渠流动, 堰流、渗流和波浪理论基础等。本书针对土木工程专业的特点, 在系统阐述基本理论与基本原理的基础上, 注重对学生理论联系实际能力的培养。

本书也可作为交通工程、水利工程、环境工程、给水排水工程和工程力学等专业流体力学(水力学)教学用书。作为土木专业主干课程的教材, 建议学时数 40 学时。

为更好地支持本课程教学, 本书作者制作了精美的教学课件, 有需要的读者可以发送邮件至 wvzhang@mail.usts.edu.cn 从作者处免费索取。

* * *

责任编辑: 王 跃 吉万旺

责任设计: 陈 旭

责任校对: 陈晶晶 赵 颖

普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材
高等学校土木工程学科专业指导委员会规划教材(按新专业规范编写)

流 体 力 学

张维佳 主编

刘鹤年 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京天成排版公司制版

北京市安泰印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14 字数: 294 千字

2011 年 9 月第一版 2011 年 9 月第一次印刷

定价: 28.00 元(赠送课件)

ISBN 978-7-112-13201-0

(20619)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本系列教材编审委员会名单

主 任：李国强

常务副主任：何若全

副 主 任：沈元勤 高延伟

委 员：（按拼音排序）

白国良	房贞政	高延伟	顾祥林
何若全	黄 勇	李国强	李远富
刘 凡	刘伟庆	祁 皓	沈元勤
王 燕	王 跃	熊海贝	阎 石
张永兴	周新刚	朱彦鹏	

组 织 单 位：高等学校土木工程学科专业指导委员会
中国建筑工业出版社

出版说明

从 2007 年开始高校土木工程学科专业教学指导委员会对全国土木工程专业的教学现状的调研结果显示, 2000 年至今, 全国的土木工程教育情况发生了很大变化, 主要表现在: 一是教学规模不断扩大。据统计, 目前我国有超过 300 余所院校开设了土木工程专业, 但是约有一半是 2000 年以后才开设此专业的, 大众化教育面临许多新的形势和任务; 二是学生的就业岗位发生了很大变化, 土木工程专业本科毕业生中 90% 以上在施工、监理、管理等部门就业, 在高等院校、研究设计单位工作的大学生越来越少; 三是由于用人单位性质不同、规模不同、毕业生岗位不同, 多样化人才的需求愈加明显。《土木工程指导性专业规范》(以下简称《规范》)就是在这种背景下开展研究制定的。

《规范》按照规范性与多样性相结合的原则、拓宽专业口径的原则、规范内容最小化的原则和核心内容最低标准的原则, 对专业基础课提出了明确要求。2009 年 12 月高校土木工程学科专业教学指导委员会和中国建筑工业出版社在厦门召开了《规范》研究及配套教材规划会议, 会上成立了以参与《规范》编制的专家为主要成员的系列教材编审委员会。此后, 通过在全国范围内开展的主编征集工作, 确定了 20 门专业基础课教材的主编, 主编均参与了《规范》的研制, 他们都是各自学校的学科带头人和教学负责人, 都具有丰富的教学经验和教材编写经历。2010 年 4 月又在烟台召开了系列规划教材编写工作会议, 进一步明确了本系列规划教材的定位和编写原则: 规划教材的内容满足建筑工程、道路桥梁工程、地下工程和铁道工程四个主要方向的需要; 满足应用型人才培养要求, 注重工程背景和工程案例的引入; 编写方式具有时代特征, 以学生为主体, 注意 90 后学生的思维习惯、学习方式和特点; 注意系列教材之间尽量不出现不必要的重复等编写原则。为保证教材质量, 系列教材编审委员会还邀请了本领域知名教授对每本教材进行审稿, 对教材是否符合《规范》思想, 定位是否准确, 是否采用新规范、新技术、新材料, 以及内容安排、文字叙述等是否合理进行全方位审读。

本系列规划教材是贯彻《规范》精神、延续教学改革成果的最好实践, 具有很好的社会效益和影响, 住房和城乡建设部已经确定本系列规划教材为《普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材》。在本系列规划教材的编写过程中得到了住房和城乡建设部人事司及主编所在学校和学院的大力支持, 在此一并表示感谢。希望使用本系列规划教材的广大读者提出宝贵意见和建议, 以便我们在规划和出版专业课教材时得以改进和完善。

高等学校土木工程学科专业指导委员会
中国建筑工业出版社
2011 年 6 月

前 言

本书是普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材，是高等学校土木工程专业指导委员会推荐教材。

随着高等学校人才培养模式的不断更新，流体力学也迎来了新的挑战。为适应新形势下的要求，在保证基本知识体系的前提下，本书力求内容精练，编排更加合理，更适合于自学。本书根据土木工程专业的特点，简化数学过程，强调知识点的物理含义与工程背景，强调研究方法与实验手段，使读者在学习过程中不断积累自己理论联系实际的意识与能力。

本书在表现手法上作了一些新的尝试。比如符号与插图等，在执行我国现行各类标准的基础上，力争与国际接轨。为便于读者进一步学习，书中关键词汇后附有英文同义词。

作为土木工程专业主干课程之一的教材，本书与时俱进，对陈旧的内容根据最新的规范予以修改。例如，水的密度是根据1989年第77届国际计量委员会会议通过的《1990年国际温标 ITS-90》修改，同时给出了热胀系数的回归方程，便于数学处理。工程背景方面根据《土木工程指导性专业规范》(2010)以及土木工程专业的专业方向，强化了小桥孔和涵管的水力计算方法，扩展了现代建筑物横向风振原因——卡门涡街的基本原理，增选了波浪理论的基础内容，以适应专业发展的不断需求。

本书由苏州科技学院张维佳主编并统稿。张维佳编写第1、8、9章，袁煦、张维佳共同编写第2、3章，王涌涛、张维佳共同编写第4、5章，吴玮编写第6、7章。

本书由哈尔滨工业大学刘鹤年教授主审。在审稿过程中，刘鹤年教授认真阅读了书稿并提出了十分宝贵的意见和建议，在此谨表诚挚的谢意。本书的编写承蒙高等学校土木工程专业指导委员会的指导、中国建筑工业出版社的帮助和苏州科技学院教学委员会的支持，在此一并致以最诚挚的感谢。

编者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

符 号 表

A —面积(m^2)	g —重力加速度, $g=9.8\text{m/s}^2$
A_r —面积比尺 [无量纲]	H —总水头(m)
a —加速度(m/s^2)	—水深(m)
—管道比阻 s^2/m^6	—堰上水头(m)
—水跃高度(m)	—高度(m)
a_r —加速度比尺 [无量纲]	H_s —水泵安装高(m)
B —宽度(m)	—最小服务水头(m)
—明渠水面宽(m)	h —水深(m)
b —明渠底宽(m)	—水头(m)
—堰宽(m)	h_C —临界水深(m)
C —谢才系数($\text{m}^{0.5}\text{s}^{-1}$)	h_c —作用面形心点水深(m)
C_D —阻力系数 [无量纲]	h_f —沿程水头损失(m)
C_d —流量系数 [无量纲]	h_l —总水头损失(m)
C_{HW} —海曾-威廉系数 [无量纲]	h_m —局部水头损失(m)
C_v —流速系数 [无量纲]	h_N —明渠均匀流正常水深(m)
c —波速(m/s)	h_p —压强水头(m)
D —圆管或圆球直径(m)	h_v —真空度(m)
d —桥墩宽度(m)	h' —水跃跃前水深(m)
Eu —欧拉数 [无量纲]	h'' —水跃跃后水深(m)
E_V —体积弹性模量(Pa)	$\bar{h}$ —平均水深(m)
e —绝对粗糙度(m)	I —惯性矩(m^4)
—明渠断面单位能量(m)	I_c —对过作用面形心轴惯性矩(m^4)
F —力(N)	i —明渠底坡 [无量纲]
F_B —浮力(N)	i_C —临界底坡 [无量纲]
F_b —质量力(N)	J —水力坡度 [无量纲]
F_D —阻力(N)	—水跃函数
F_G —重力(N)	J_p —测压管水头线坡度 [无量纲]
F_{Gr} —重力比尺 [无量纲]	—明渠水面线坡度 [无量纲]
F_I —惯性力(N)	K —流量模数(m^3/s)
F_{Ir} —惯性力比尺 [无量纲]	—仪器常数($\text{m}^{2.5}/\text{s}$)
F_P —压力(N)	—卡门通用常数 [无量纲]
F_{Pr} —压力比尺 [无量纲]	k —渗透系数(m/s)
Fr —弗汝德数 [无量纲]	—波数
F_s —表面力(N)	L —长度(m)
F_V —黏滞力, 切向力(N)	l —长度(m)
F_{Vr} —黏滞力比尺 [无量纲]	—混合长度(m)
f —单宽力(N/m)	l_r —长度比尺 [无量纲]
f_b —单位质量力(N)	m —质量(kg)

—堰流量系数 [无量纲]
 —明渠边坡系数 [无量纲]
 n —粗糙系数 [无量纲]
 —土壤的孔隙度 [无量纲]
 P —湿周(m)
 —堰高(m)
 p —压强或相对压强(Pa)
 p_{abs} —绝对压强(Pa)
 p_a —大气压强(Pa)
 p_v —真空压强(Pa)
 Q —流量(m^3/s)
 Q_p —通过流量(m^3/s)
 Q_s —途泄流量(m^3/s)
 q —节点流量(m^3/s)
 —单宽流量(m^2/s)
 R —水力半径(m)
 —影响半径(m)
 —气体常数 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
 Re —雷诺数 [无量纲]
 R_h —水力最优水力半径(m)
 r —半径(m)
 r_0 —圆管半径(m)
 T —温度($^{\circ}\text{C}$)
 —时间(s)
 S —抽水深度(m)
 St —斯特劳哈尔数 [无量纲]
 s —管道阻抗(s^2/m^5);
 t —时间(s)
 t_r —时间比尺 [无量纲]
 U —流速(m/s)
 u —流速(m/s)
 u_r —流速比尺 [无量纲]
 V —体积(m^3)
 V_r —体积比尺 [无量纲]
 v —断面平均流速(m/s)
 v_r —流速比尺 [无量纲]
 v^* —阻力流速(m/s)
 X —单位质量力 x 方向分力(m/s^2)
 x —坐标值(m)
 Y —单位质量力 y 方向分力(m/s^2)
 y —坐标值(m)
 y_c —作用面形心点坐标值(m)
 y_D —压力中心坐标值(m)
 Z —单位质量力 z 方向分力(m/s^2)

z —坐标值(m)
 —位置水头,距基准面高度(m)
 —标高(m)
 α —角度
 —动能修正系数 [无量纲]
 —无压圆管充满度 [无量纲]
 α_h —水力最优充满度 [无量纲]
 α_v —热胀系数($^{\circ}\text{C}^{-1}$ 或 K^{-1})
 β —动量修正系数 [无量纲]
 β_h —水力最优宽深比 [无量纲]
 δ —壁厚(m)
 —边界层厚度(m)
 —堰顶厚度(m)
 δ_v —黏性底层厚度(m)
 ϵ —收缩系数 [无量纲]
 —变形速度(s^{-1})
 —相位差
 ζ —局部阻力系数 [无量纲]
 —波浪铅垂位移(m)
 ζ_k —边墩系数 [无量纲]
 ζ_o —闸墩系数 [无量纲]
 ζ' —墩型系数 [无量纲]
 θ —角度
 θ_h —水力最优充满角
 κ —压缩系数(Pa^{-1})
 λ —模型比尺 [无量纲]
 —沿程阻力系数 [无量纲]
 —波长
 μ —动力黏度($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
 —流量系数 [无量纲]
 ν —运动黏度(m^2/s)
 ξ —相位差
 ρ —密度(kg/m^3)
 σ —表面张力系数(N/m)
 —堰淹没系数 [无量纲]
 τ —切应力(Pa)
 τ_0 —壁面切应力(Pa)
 φ —流速势
 —流速系数 [无量纲]
 ψ —流函数
 —进口形状系数
 ω —角速度(s^{-1})
 —角频率

目 录

符号表

第 1 章 绪论 1

本章知识点 1

1.1 流体力学及其任务 1

1.2 流体的主要物理性质 2

1.2.1 惯性 2

1.2.2 黏滞性 3

1.2.3 压缩性与热胀性 5

1.2.4 表面张力特性 8

1.2.5 汽化压强特性 8

1.3 作用在流体上的力 9

1.3.1 表面力 9

1.3.2 质量力 9

小结及学习指导 10

习题 10

第 2 章 流体静力学 12

本章知识点 12

2.1 静止流体中压强的性质 12

2.2 重力作用下静止流体中压强的分布规律 14

2.2.1 流体静力学基本方程式 14

2.2.2 帕斯卡原理——压强的等值传递 15

2.2.3 压强的度量 15

2.2.4 测压管水头 16

2.2.5 压强的计量单位 18

2.2.6 压强分布图 18

2.3 液体作用在平面壁上的总压力 19

2.3.1 解析法 19

2.3.2 图算法 21

2.4 液体作用在曲面壁上的总压力 21

2.4.1 液体作用在曲面壁上的总压力 22

2.4.2 液体作用在潜体与浮体上的总压力—阿基米德原理 24

小结及学习指导 25

习题 25

第 3 章 流体动力学基础 29

本章知识点 29

3.1 流体运动的描述方法 29

3.1.1 拉格朗日法 29

3.1.2 欧拉法 30

3.2 欧拉法的基本概念 31

3.2.1 恒定流和非恒定流 31

3.2.2 一元、二元和三元流动 32

3.2.3 流线 32

3.2.4 均匀流和非均匀流 32

3.2.5 元流和总流 33

3.2.6 流量和断面平均流速 33

3.3 连续性方程 34

3.4 伯努利方程 35

3.4.1 理想流体元流伯努利方程 35

3.4.2 伯努利方程的意义 36

3.4.3 实际流体元流的伯努利方程 38

3.4.4 实际流体总流的伯努利方程 38

3.4.5 有机械能输入或输出的伯努利方程 41

3.4.6 两断面间有分流或汇流的伯努利方程 41

3.4.7 气体伯努利方程	42	4.6.2 边界层分离现象	93
3.5 动量方程	44	4.6.3 卡门涡街	95
3.6 势流理论基础	47	4.6.4 物体的绕流阻力	96
3.6.1 微团运动的分解	47	小结及学习指导	98
3.6.2 微团运动的组成分析	48	习题	98
3.6.3 有旋运动和无旋运动	50	第5章 有压流动	101
3.6.4 平面流动	52	本章知识点	101
3.6.5 几种基本的平面势流	53	5.1 孔口出流	101
3.6.6 势流叠加	55	5.1.1 薄壁小孔口出流	101
3.7 相似原理	57	5.1.2 大孔口出流	103
3.7.1 相似原理	57	5.1.3 孔口非恒定出流	103
3.7.2 模型实验	60	5.2 管嘴出流	104
小结及学习指导	63	5.2.1 圆柱形外管嘴恒定出流	104
习题	63	5.2.2 收缩断面的真空	105
第4章 流动阻力	68	5.2.3 圆柱形外管嘴的正常工作条件	106
本章知识点	68	5.3 短管的水力计算	107
4.1 概述	68	5.3.1 短管出流的基本公式	107
4.1.1 流动阻力的分类	68	5.3.2 短管有压流的设计	108
4.1.2 水头损失的计算	69	5.3.3 短管水力计算实例	108
4.1.3 沿程水头损失与切应力的关系	69	5.4 长管的水力计算	110
4.2 黏性流体的两种流态	70	5.4.1 简单管道	110
4.2.1 雷诺实验	70	5.4.2 串联管道	113
4.2.2 沿程损失 h_f 和平均流速 v 的关系	71	5.4.3 并联管道	114
4.2.3 流态的判别标准	72	5.4.4 沿程均匀泄流管道	115
4.3 层流运动	74	小结及学习指导	117
4.3.1 圆管均匀层流	74	习题	117
4.3.2 二元明渠均匀层流	76	第6章 明渠流动	120
4.4 湍流运动	78	本章知识点	120
4.4.1 湍流结构	78	6.1 概述	120
4.4.2 湍流运动的特征与时均化	78	6.1.1 明渠的几何形态	120
4.4.3 湍流的切应力与流速分布	80	6.1.2 明渠水流运动特点及流动分类	123
4.5 水头损失的计算	81	6.2 明渠均匀流	124
4.5.1 沿程水头损失的计算	81	6.2.1 明渠均匀流的流动特征	124
4.5.2 局部水头损失	89	6.2.2 明渠均匀流的形成条件	124
4.6 边界层与绕流阻力	92	6.2.3 明渠均匀流水力计算基本公式	125
4.6.1 边界层的基本概念	92		

6.2.4 梯形断面明渠均匀流
水力计算 126

6.2.5 无压圆管均匀流水力计算 132

6.3 明渠流动状态 136

6.3.1 明渠流态的运动学分析 136

6.3.2 明渠流态的动力学分析 138

6.4 明渠非均匀流 144

6.4.1 明渠非均匀流概述 144

6.4.2 明渠恒定非均匀急变流 144

6.4.3 明渠非均匀渐变流 150

小结及学习指导 159

习题 159

第7章 堰流 161

本章知识点 161

7.1 堰流的分类 161

7.1.1 堰流和堰的几何要素 161

7.1.2 堰的分类 162

7.2 堰流的水力计算 164

7.2.1 薄壁堰 164

7.2.2 实用堰 168

7.2.3 宽顶堰 171

7.3 小桥孔径的水力计算 176

7.3.1 小桥孔过流现象及过流能力计算 177

7.3.2 小桥孔径水力计算 178

7.4 无压涵洞的水力计算 182

7.4.1 涵洞的分类 183

7.4.2 无压涵洞水力现象分析 184

7.4.3 无压短涵水力计算 186

小结及学习指导 188

习题 188

第8章 渗流 190

本章知识点 190

8.1 概述 190

8.1.1 水在土壤中的状态 190

8.1.2 渗流模型 190

8.2 渗流的达西定律 191

8.3 地下水的渐变渗流 193

8.3.1 杜比公式 193

8.3.2 渐变渗流基本方程 194

8.3.3 渐变渗流浸润曲面的分析 194

8.4 井和井群 196

8.4.1 普通完整井 196

8.4.2 自流完整井 197

8.4.3 大口井 198

8.4.4 渗渠 199

8.4.5 井群 199

小结及学习指导 201

习题 201

第9章 波浪理论基础 202

本章知识点 202

9.1 基本方程 203

9.1.1 基本方程 203

9.1.2 边界条件 203

9.1.3 初始条件 204

9.2 平面驻波 205

9.3 平面行进波 207

小结及学习指导 209

附录 部分习题答案 210

主要参考文献 212

本章知识点

【知识点】流体的流动性，连续介质模型，惯性、黏滞性、压缩性与热胀性等流体的主要物理性质，作用在流体上的力。

【重点】掌握黏滞性的概念、牛顿内摩擦定律的意义，掌握作用在流体上力的分类与表达，掌握理想流体与不可压缩流体的含义。

【难点】对黏滞性的理解。

1.1 流体力学及其任务

流体力学(fluid mechanics)是力学的一个分支，是以流体为研究对象的、以其机械运动规律及其应用为研究目的的一门科学。

流体(fluid)包括液体(liquid)和气体(gas)。

流体不同于固体的最基本特征就是具有流动性(mobility)。流动性是指在任何微小切力的作用下，流体都会连续变形的特性，这种变形称为流动。直到切力消失，流动才会停止。无论静止或运动，流体几乎不能承受拉力，只能承受压力。

力学研究的内容是物体机械运动规律。流体运动遵循机械运动的普遍规律，如质量守恒定律、牛顿运动定律、能量转化和守恒定律等，并以这些普遍规律，形成流体力学理论的基础。

与所有物质相同，流体是由大量的分子构成的。由于分子之间存在空隙，描述流体的物理量(如密度、压强和流速等)在空间的分布是不连续的；分子的随机热运动又导致了空间任一点上流体物理量在时间上变化的不连续。流体力学的研究内容是流体的宏观运动规律，而这一规律恰恰是研究对象中所有分子微观运动的宏观表现。欧拉(L. Euler，瑞士数学家与力学家，1707~1783)于1755年首先提出了连续介质(continuum)模型的概念，即把流体看成是由密集质点构成的、内部无空隙的连续体。这里的质点是指与流动空间相比体积可以忽略不计而又具有一定质量的流体微团。连续介质模型的提出既可避开分子运动的复杂性，又可将流体运动中的物理量视为空间坐标和时间变量的连续函数，采用数学分析方法来研究流体运动。

流体力学的问题可以通过理论分析、实验研究和数值计算等三种研究方

法得以解决。理论分析和实验研究是本学科形成以来,一直采用的、既可以单独解决问题又可互补的手段。前者通过对流体性质及流动特性的科学抽象,提出合理的理论模型,应用已有的普遍规律,建立控制流体运动的方程组,将流动问题转化为数学问题,并在一定的边界条件和初始条件下求解。后者则是通过对具体流动的观测与测量来认识流动的规律。理论分析结果需要经过实验验证,实验又须用理论来指导。数值计算则是近年来随着计算技术和计算机技术的不断发展,采用各种离散化方法(有限元法或有限差分法等),建立数值模型,通过计算机进行计算,获得定量描述流场的现代方法。

作为一门独立学科,流体力学可以借助上述三种方法直接解决工程实际问题。作为专业基础,可在诸多的领域中得到广泛的应用。例如航海领域中的船舶航行;航空领域中的飞机飞行;水利工程中的引水与防洪;动力工程中的水力与火力发电;机械工程中的液压传动与润滑;石油工程中的固井、采油与输油;化学工程中的分离、成型与输送;医疗领域中的体内微循环与血液流变;体育竞赛中游泳、赛艇、赛车与球类;军事工程中的导弹与鱼雷;农业的喷灌;水利工程中的导流与泄洪;市政工程的输配水;环境工程中的废水与废气处理;通风与空调工程中的气流组织;特别是在结构工程中,建筑物所承受的风荷载与波浪荷载、基坑排水以及道路桥涵等更是涉及了一系列的流体力学问题。

1.2 流体的主要物理性质

1.2.1 惯性

惯性(inertia)是物体维持原有运动状态的性质,是流体与固体共有的物理性质。质量是惯性大小的度量。单位体积的质量称为密度(density),以符号 ρ 表示。体积为 V 、质量为 m 的均质流体的密度可表示为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

各点密度不相同的非均质流体密度可表示为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-2)$$

密度的单位是千克每立方米(kg/m^3)。

液体的密度,随压强和温度变化的量很小,通常情况下可视为常数,水的密度近似为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$,水银的密度近似为 $13600\text{kg}/\text{m}^3$ 。

在一个标准大气压条件下,水和空气的密度分别见表1-1和表1-2。其他几种常见流体的密度见表1-3。

水的密度

表 1-1

温度($^{\circ}\text{C}$)	0	4	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
密度(kg/m^3)	999.840	999.972	999.699	998.203	995.645	992.212	998.030	983.191	977.759	971.785	965.304	958.345

空气的密度

表 1-2

温度(℃)	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100
密度(kg/m³)	1.293	1.270	1.248	1.226	1.205	1.185	1.165	1.128	1.093	1.060	1.000	0.947

其他几种常见流体的密度(20℃)

表 1-3

流体名称	氢气	氧气	二氧化碳	汽油(93号)	酒精	煤油	海水	甘油	水银
密度(kg/m³)	0.084	1.33	1.84	725	789	808	1030	1263	13550

1.2.2 黏滞性

黏滞性(viscosity)是流体特有的物理性质。

间距为 h 的两个平行平板间充满静止液体, 见图 1-1。下板固定不动, 上板以速度 U_0 平行下板运动。紧贴下板的液体粘附在板壁上, 速度为零; 紧贴上板的液体则随其以速度 U_0 运动。在 U_0 、 h 都比较小的情况下, 两平板间各流层的液体速度沿法线方向近似呈直线分布。

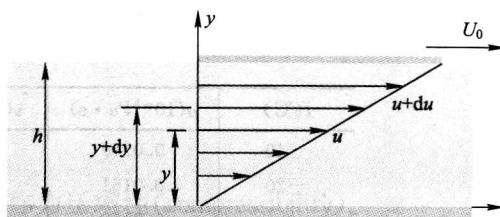


图 1-1 黏滞性实验

随上板一同运动的相邻流层, 自上而下地带动内部各流层运动。相反, 静止的下板及其相邻流层又自下而上地影响各层的流动。这说明流体内部各流层间存在着切向力, 即所谓的内摩擦力。这种由于流体相对运动产生内摩擦力以抵抗其运动的性质称为黏滞性。或者说, 黏滞性就是流体的内摩擦特性。

根据研究, 牛顿(I. Newton, 英国物理学家, 1642~1727)于 1687 年提出: 内摩擦力(切力) F_v 与流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 成比例, 与流层的相互接触面积 A 成比例, 与流体的性质有关, 即

$$F_v = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

或

$$\tau = \frac{F_v}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

上式称为牛顿内摩擦定律(Newton's equation of viscosity)。

比例系数 μ 称为动力黏度(dynamic viscosity), 单位是帕秒(Pa·s)。动力黏度是流体黏滞性的度量, μ 值越大, 流体越黏, 流动性越差。

流体的黏滞性还可用力黏度 μ 与流体密度 ρ 的比值表示, 即运动黏度(kinematic viscosity)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-5)$$

运动黏度 ν 的单位为平方米每秒(m^2/s)。

流体的黏滞性随温度而变化, 不同温度下水和空气的黏度分别见表 1-4 和

表 1-5。其他几种常见流体的黏度见表 1-6。

不同温度下水的黏度						表 1-4
$t(^{\circ}\text{C})$	$\mu(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	$t(^{\circ}\text{C})$	$\mu(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	
0	1.792	1.792	40	0.654	0.659	
5	1.519	1.519	45	0.597	0.603	
10	1.310	1.310	50	0.549	0.556	
15	1.145	1.146	60	0.469	0.478	
20	1.009	1.011	70	0.406	0.415	
25	0.895	0.897	80	0.357	0.367	
30	0.800	0.803	90	0.317	0.328	
35	0.721	0.725	100	0.284	0.296	

不同温度下空气的黏度						表 1-5
$t(^{\circ}\text{C})$	$\mu(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	$t(^{\circ}\text{C})$	$\mu(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	
-40	0.0149	9.80	60	0.0201	19.6	
-20	0.0161	11.5	70	0.0204	20.5	
0	0.0172	13.7	80	0.0210	21.7	
10	0.0178	14.7	90	0.0216	22.0	
20	0.0183	15.7	100	0.0218	23.6	
30	0.0187	16.6	120	0.0228	26.2	
40	0.0192	17.6	160	0.0242	30.6	
50	0.0196	18.6	200	0.0259	35.8	

其他几种常见流体的黏度(20℃)										表 1-6
流体名称	氢气	氧气	二氧化碳	四氯化碳	水银	煤油	原油	SAE10 润滑油	甘油	
$\mu(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.009	0.020	0.015	0.970	1.56	1.92	7.20	82.0	1499	
$\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	107.1	15.04	8.043	0.611	0.115	2.38	8.41	89.3	1191	

可以看出，水和空气的黏度随温度的变化规律是不相同的。液体的黏滞性主要是由于分子间引力作用的结果。温度升高时，液体分子动能增大，引力减小。因此，作为液体的代表，水的黏度随温度的升高而减小。气体的黏滞性则主要是分子热运动产生的动量交换所致，温度越高，分子的动量越大，动量交换越激烈。因此，作为气体的代表，空气的黏度随温度的升高而增大。

【例题 1-1】 如图 1-2 所示，相距 20mm 的两平行平板间充满 20℃ 的某种润滑油，油中有一面积 $A=0.5\text{m}^2$ 、厚度忽略不计的薄板，该薄板与两平板平行并与一侧平板间距 $h_1=7\text{mm}$ 。若以速度 $u=0.1\text{m/s}$ 拖动薄板，试求拖动该薄板所需的拉力。



图 1-2 油中薄板

【解】

查表 1-6 得 $\mu=0.082\text{Pa}\cdot\text{s}$

由式(1-3)得薄板上表面所需拉力为

$$F_{v1} = \mu A \frac{du}{dy} = 0.082 \times 0.5 \times \frac{0.1}{0.007} = 0.586 \text{ N}$$

薄板下表面所需拉力为

$$F_{v2} = 0.082 \times 0.5 \times \frac{0.1}{0.013} = 0.315 \text{ N}$$

薄板所需拉力为

$$F_v = F_{v1} + F_{v2} = 0.586 + 0.315 = 0.901 \text{ N}$$

黏滞性往往给流体运动规律的研究带来困难。为了简化理论分析，特引入理想流体(ideal fluid)，或无黏性流体的概念。相对于真实流体或黏性流体，理想流体是指不存在黏滞性或黏度为零的流体。理想流体并不存在，只是一种对物性简化的模型。实际应用时，应考虑对忽略黏滞性所产生偏差的修正。

1.2.3 压缩性与热胀性

压强增大，流体体积缩小，密度增大的性质称为压缩性(compressibility)。温度升高，流体体积增大，密度减小的性质称为热胀性(thermal expansion)。

1.2.3.1 液体的压缩性与热胀性

液体的压缩性用压缩系数 κ 表示。一定温度下，液体的体积为 V ，压强增加 dp 后，体积减小 dV ，则压缩系数可表示为

$$\kappa = -\frac{dV/V}{dp} \quad (1-6)$$

压缩系数 κ 的单位为每帕斯卡(Pa^{-1})。

根据液体压缩前后，质量 ρV 不变，可得

$$-\frac{dV}{V} = \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-7)$$

于是压缩系数还可表示为

$$\kappa = \frac{d\rho/\rho}{dp} \quad (1-8)$$

液体的压缩系数随温度和压强变化。水在 0°C 时，不同压强下的压缩系数见表1-7。

水的压缩系数

表 1-7

压强(Pa)	5×10^5	10×10^5	20×10^5	40×10^5	80×10^5
压缩系数(Pa^{-1})	0.538×10^{-9}	0.536×10^{-9}	0.531×10^{-9}	0.528×10^{-9}	0.515×10^{-9}

压缩系数的倒数是体积弹性模量(bulk modulus)，即

$$E_v = \frac{1}{\kappa} = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-9)$$

体积弹性模量 E_v 的单位为帕斯卡(Pa)。进行水击计算时，水的体积弹性模量可取 $E_v = 2.1 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。

【例题 1-2】 压强增加多少能使水的体积分别减小0.1%和1%?

【解】

由式(1-9)得

$$\Delta p = -E_v \frac{\Delta V}{V}$$

当 $\frac{\Delta V}{V} = -0.1\%$ 时, 压强增量

$$\Delta p = -2.1 \times 10^9 \times (-0.001) = 2.1 \times 10^6 \text{ Pa} = 2.1 \text{ MPa}$$

当 $\frac{\Delta V}{V} = -1\%$ 时, 压强增量

$$\Delta p = -2.1 \times 10^9 \times (-0.01) = 21 \text{ MPa}$$

液体的热胀性用热胀系数 α_v 表示。一定压强下, 液体的体积为 V , 温度升高 dT 后, 体积增加 dV 或密度减少 $d\rho$, 则热胀系数可表示为

$$\alpha_v = \frac{dV/V}{dT} = -\frac{d\rho/\rho}{dT} \quad (1-10)$$

热胀系数 α_v 的单位是温度的倒数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 或 K^{-1} 。

液体的热胀系数随压强和温度而变化, 水在 1 个大气压下, 热胀系数与温度的关系曲线见图 1-3。实用中, 可采用该关系曲线的回归式

$$\alpha_v = (-5.754 \times 10^{-7} T^4 + 1.705 \times 10^{-4} T^3 - 2.015 \times 10^{-2} T^2 + 1.698 T - 6.497) \times 10^{-5} \quad (1-11)$$

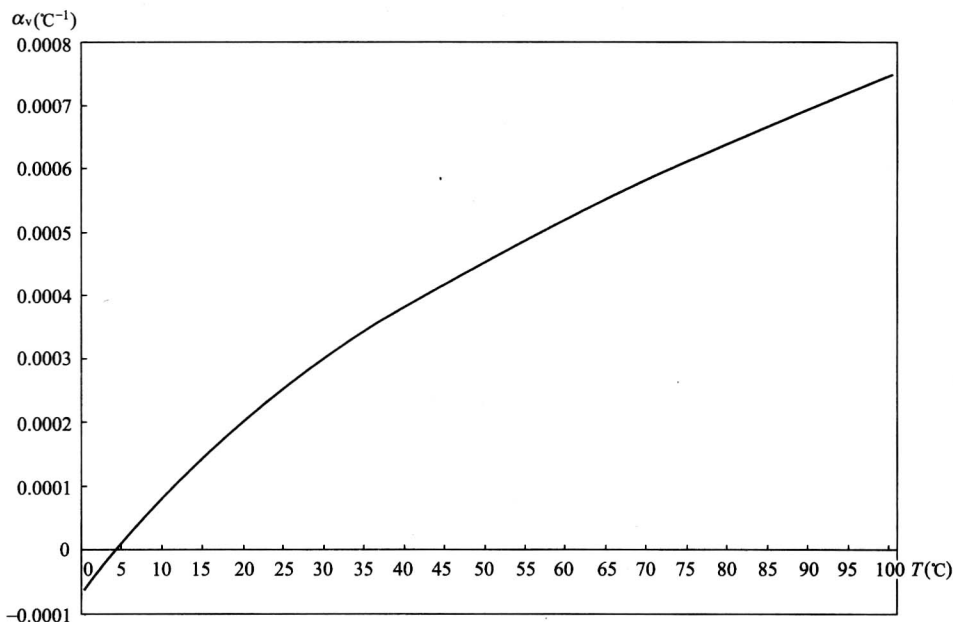


图 1-3 热胀系数与温度的关系曲线

通常情况下, 水的压缩性和热胀性都很小, 可忽略不计。但在特殊情况下, 如输送液体管道中阀门突然关闭时, 由于水击导致了较大的压差, 就必须要考虑液体的密度随压强的变化; 同样道理, 在液压封闭系统或热水采暖系统中, 必须要考虑较大工作温度变化时液体体积膨胀。